

G.N. Klavsut, N.V. Kuleshov, A.A. Pavlyuk. // Appl. Phys. B 81. – 2005. – P. 1119-1121.

3. Andreas Schmidt, Simon Rivier, Uwe Griebner, Valentin Petrov. Tunable Laser Operation of Yb:NaY(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>. // IEEE – 2008.

УДК 620.179.14

## О ВЫБОРЕ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ ВИХРЕТОКОВОГО ТОЛЩИНОМЕРА С НАКЛАДНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

Чернышев А.В.

Институт прикладной физики НАН Беларуси  
Минск, Республика Беларусь

При разработке вихретокового толщиномера необходимо выбрать оптимальное значение его рабочей частоты, при которой обеспечивается контроль толщины проводящего листа (или проводящего покрытия на проводящем основании) в заданном интервале ее значений. В качестве основной величины при этом используется представление о глубине проникновения поля возбуждения в контролируемый образец. Известна формула для определения глубина проникновения плоской электромагнитной волны в проводящее магнитное (или немагнитное) полупространство, обозначим ее как  $\delta_{st}$ , она имеет вид

$$\delta_{st} = 503 \sqrt{\frac{1}{f \mu \sigma}} \quad (1),$$

где  $f$  – частота поля возбуждения,  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость полупространства,  $\sigma$  – его удельная электрическая проводимость. На такой глубине амплитуда плотности вихревых токов (или амплитуда напряженности магнитного поля возбуждения) в  $e$  раз меньше той, которая имеется на поверхности полупространства. В вихретоковых преобразователях часто используются накладные преобразователи. Распределение в пространстве вектора напряженности переменного магнитного поля возбуждения, создаваемого накладным преобразователем, существенно отличается от распределения в пространстве вектора напряженности переменного магнитного поля плоской электромагнитной волны. В результате реальная глубина проникновения в проводящий образец магнитного поля возбуждения витка или плотности вихревых токов, наведенных этим полем, обозначим в этом случае ее как  $\delta$ , оказывается меньшей, чем  $\delta_{st}$  [1]. Очевидно, поле возбуждения проникает в образец на значительно большую глубину, чем  $\delta$  (или  $\delta_{st}$ ). Например, на глубине, равной  $3\delta_{st}$ , амплитуда плотности вихревых токов составляет примерно 5% от амплитуды плотности вихревых токов на поверхности полупространства. Вопрос о выборе частоты поля возбуждения, при которой обеспечивается контроль толщины проводящего листа (или толщины поводящего покрытия

на проводящей подложке) в заданном интервале ее значений, рассмотрен в настоящей работе.

Методика расчета следующая. Полагается, что над проводящим листом или над проводящей двухслойной средой расположен виток (имеющий радиус  $R$ ), через который пропускается переменный ток синусоидальной формы с фиксированной частотой  $f$ . Толщина листа или толщина верхнего слоя двухслойной среды обозначена как  $d$ . Зазор между витком и пластиной –  $h$ . Радиус измерительной катушки полагался равным радиусу витка поля возбуждения  $R$ , она содержит один виток и расположена соосно с витком возбуждения между ним и контролируемой пластиной на расстоянии  $0,5 \cdot h$  от нее, ось витка перпендикулярна поверхности листа. Анализируется зависимость амплитуды вносимой в измерительную катушку эдс от  $d$ . Для определения  $\delta$  анализировалась зависимость амплитуды плотности вихревых токов  $J$  в пластине от расстояния (вглубь пластины) до ее поверхности. Для определения амплитуды эдс измерительной катушки и  $J$  находился модуль комплексной амплитуды вектор-потенциала  $\vec{A}$  в пластине и в свободном пространстве над ней по аналитическим выражениям, приведенным в [2].

Рассмотрим результаты численных вычислений. Сначала предположим, что виток с  $R = 0,003$  м расположен над протяженным проводящим немагнитным листом, электропроводность  $\sigma$  материала которого равна  $6 \cdot 10^7$  См/м (что примерно соответствует электропроводности меди), зазор между витком и пластиной  $h = 0,001$  м. Полагаем, что через виток пропускается переменный ток с амплитудой 1 А, его частота  $f = 10$  кГц. Анализируется амплитуда вносимой эдс измерительной катушки, которая содержит один виток, имеет радиус, равный 0,003 м, и расположена на середине расстояния между витком поля возбуждения и поверхностью листа. Обе катушки расположены соосно, их общая ось перпендикулярна поверхности пластины.

Первоначально полагается, что толщина листа  $d$  заведомо больше той глубины, с которой возможно зафиксировать информацию об отклонениях от однородного распределения  $\sigma$  в объеме листа на основе анализа амплитуды вноси-

мой эдс измерительной катушки. (Для выбранного материала при рассматриваемом значении  $f$  величина  $\delta_{st} = 650$  мкм.). Так, при  $d = 1$  м амплитуда эдс  $E$  измерительного витка равна 171,6 мкВ, обозначим ее как  $E_0$ . Данное значение  $E$  сохраняется, с точностью до 0,1 мкВ, при уменьшении толщины листа вплоть до  $d = 800$  мкм. При дальнейшем уменьшении  $d$  величина  $E$  начинает изменяться. Например, при уменьшении  $d$  с 800 мкм до 600 мкм значение  $E$  изменяется на 0,64 %, что вполне может быть зафиксировано электронными средствами измерения (понятно, приняв необходимые меры по уменьшению влияния различных помех, шумов). Таким образом, можно считать, что с глубины листа, примерно равной  $\delta_{st}$  (и менее), может быть зафиксирована, на основе измерения амплитуды выходной эдс измерительной катушки, информация о существенном изменении значения  $\sigma$  (в данном случае  $\sigma$  скачкообразно изменяется от  $6 \cdot 10^7$  См/м до нулевого значения) или плотности вихревых токов. Другими словами, начиная с такой толщины листа можно получать информацию о его толщине на основе измерения  $E$ .

Расчет величины реальной  $\delta$  глубины проникновения плотности вихревых токов в рассматриваемый лист от рассматриваемого же витка с током показывает, что она составляет 347 мкм. Отметим, что, как показывают численные расчеты, данное соотношение  $\delta \approx 0,5 \cdot \delta_{st}$  выполняется при изменениях в относительно широких пределах величин  $R$ ,  $f$  и  $\sigma$ . Следовательно, можно сделать вывод, что на основе анализа величины  $E$  измерительной катушки накладного вихретокового преобразователя можно получить информацию о толщине листа в случае, когда она не превышает  $2 \cdot \delta \approx \delta_{st}$ .

Рассмотрим результаты аналогичного расчета, но полученные при большей частоте поля возбуждения – 300 кГц. В этом случае для прежнего образца и неизменных остальных параметрах накладного преобразователя  $\delta_{st} = 119$  мкм,  $\delta = 57$  мкм. Заметное изменение величины  $E$ , по мере уменьшения  $d$ , наблюдается начиная со значения  $d = 100$  мкм. При уменьшении  $d$  от 100 мкм до 80 мкм величина  $E$  изменяется на 0,42 %. Следовательно, и в этом случае на основе анализа величины  $E$  измерительной катушки накладного вихретокового преобразователя можно получить информацию о толщине листа, когда она не превышает  $2 \cdot \delta \approx \delta_{st}$ .

Такой же анализ был проведен при рассмотрении проникновения вихревых токов в лист из хрома ( $\sigma$  принято равным 5260000 См/м), при этом предполагалось, что она находится на подложке бесконечно большой толщины, изготовленной из никеля (для которого было принято  $\sigma = 11500000$  См/м,  $\mu = 40$ ). Частота  $f =$

300 кГц, все остальные параметры накладного преобразователя такие же, как в предыдущем случае. Для листа из хрома при выбранной  $f$  значение  $\delta_{st} = 400$  мкм, рассчитанная реальная глубина проникновения  $\delta = 207$  мкм. В этом случае при уменьшении толщины листа хрома  $d$  с 0,1 м до 400 мкм величина  $E$  сохраняет неизменное начальное значение  $E_0$ , при уменьшении  $d$  с 400 мкм до 300 мкм амплитуда  $E$  изменяется примерно на 1 %. Таким образом, и в этом случае получено, что с глубины листа, примерно равной  $\delta_{st}$  (и менее), может быть зафиксирована, на основе измерения амплитуды выходной эдс измерительной катушки, информация о существенном изменении значения  $\sigma$  в его объеме (в данном случае отметим, что подложка изготовлена из проводящего магнитного материала).

Был также проведен расчет в предположении, что лист стальной (параметры накладного преобразователя прежние). Полагалось, что  $\mu = 100$ ,  $\sigma = 8000000$  См/м,  $f = 10$  кГц. Результаты расчета следующие. В этом случае величина  $\delta$  ближе к  $\delta_{st}$  а именно,  $\delta_{st} = 178$  мкм, а  $\delta = 135$  мкм (то есть не выполняется, как ранее, соотношение  $\delta \approx 0,5 \cdot \delta_{st}$ ). Заметное изменение  $E$  начинает наблюдаться лишь при величинах  $d$ , меньших 300 мкм. Так, при уменьшении  $d$  с 300 мкм до 200 мкм амплитуда  $E$  изменяется примерно на 0,5%. Видно, что в данном случае на основе анализа величины  $E$  измерительной катушки накладного вихретокового преобразователя можно получить информацию о существенном изменении плотности вихревого тока с глубины, несколько превышающей  $\delta_{st}$ , но, как и ранее, примерно равной  $2 \cdot \delta$ .

Анализ результатов численных расчетов позволяет сделать вывод, что при контроле толщин проводящего (в том числе магнитного) листа или верхнего слоя двухслойной структуры (слои также проводящие и могут быть магнитными) накладным преобразователем относительно небольшого диаметра (порядка нескольких миллиметров) выбор рабочей частоты толщиномером можно производить на основе выражения (1). При этом под  $\delta_{st}$  следует подразумевать максимальную толщину листа или покрытия двухслойной структуры, которую необходимо контролировать.

1. Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – Т. 2. Вихретоковый контроль. Кн. 2. – 688 с.
2. Соболев, В.С. Накладные и экранные датчики / В.С. Соболев, Ю.М. Шкарлет. – Новосибирск: Наука, 1967. – 144 с.